

Research Article

Open Access

기후변화가 벼 병해충 피해면적 발생에 미치는 영향분석

정학균,^{1*} 김창길,¹ 문동현¹

¹한국농촌경제연구원 자원환경연구부

An Analysis of Impacts of Climate Change on Rice Damage Occurrence by Insect Pests and Disease

Hak-Kyun Jeong,^{1*} Chang-Gil Kim,¹ Dong-Hyun Moon¹ (¹Department of Resource & Environment Research, Korea Rural Economic Institute, Seoul, 130-710, Korea)

Received: 10 September 2013 / Revised: 15 November 2013 / Accepted: 16 January 2014

Copyright © 2014 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

BACKGROUND: It is known that impacts of climate change on damage occurrence by insect pests and diseases are increasing. The negative effects of climate change on production will threaten our food security. It is needed that on the basis of analysis of the impacts, proper strategies in response to climate change are developed.

METHODS AND RESULTS: The objective of this paper is to estimate impacts of climate change on rice damage occurrence by insect pests and diseases, using the panel model which analyzes both cross-section data and time series data. The result of an analysis on impacts of climate change on rice damage occurrence by pest insect and disease showed that the damage occurrence by Rice leaf roller and Rice water weevil increased if temperature increased, and damage occurrence by Stripe, Sheath blight, and Leaf Blast increased if precipitation(or amount of sunshine) increased(or decreased).

CONCLUSION: Adaptation strategies, supplying weather forecasting information by region, developing systematical strategies for prevention of damage occurrence by pest

insect and disease, analyzing the factors of damage occurrence by unexpected pest insect and disease, enforcing international cooperation for prevention of damage occurrence are needed to minimize the impacts of damage occurrence on rice production.

Key words: Climate change, Damage occurrence, International cooperation, Panel model, Systematical strategies

서론

우리나라의 기후변화는 다른 나라에 비해 빠르게 진행되어 왔으며 최근 들어 이상기상도 빈발하고 있다. 대표농도경로(Representative Concentration Pathways, RCP)를 적용한 신 기후변화 시나리오에 의한 전망에 따르면 기후변화 완화를 위한 노력 없이 현재 추세로 온실가스 배출이 지속되는 경우(RCP 8.5) 21세기 말 한반도 평균기온은 6.0°C 상승하고, 강수량은 20.4% 증가할 것으로 예상되고 있다(National Institute of Meteorological Research, NIMR 2011).

기후변화는 농업생태계에 영향을 미쳐 병해충 발생과 개체군의 이동 및 생물다양성에 영향을 준다(Kim *et al.*, 2009; Kim *et al.*, 2011). 벼멸구와 흑명나방을 대상으로 기후변화가 병해충 개체군동태(population dynamics)에 미치는 영

*교신저자(Corresponding author): Hak-Kyun Jeong
Phone: +82-2-3299-4248; Fax: +82-2-960-0164;
E-mail: hak8247@krei.re.kr

향을 분석한 결과, 기온상승이 병해충 개체군동태 변화에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(Karuppaiah and Sujayanad, 2012). 또, General Circulation model(GCM)을 이용하여 유럽지역 옥수수 조명나방(Corn borer)을 대상으로 분석한 결과, 조명나방의 분포가 북쪽으로 1.2km 정도 이동하는 것으로 나타났다(Porter *et al.*, 1991). 뿐만 아니라 일본의 경우 지구온난화에 의해 배추좀나방(*Plutella xylostella*)이 줄어들고, 왕담배(*Helicoverpa armigera*)와 양배추은무늬밤나방(*Trichoplusia ni*)은 증가할 것으로 전망되었다(Kiritani, 2006). 산소나무풍뎅이(Mountain pine beetle)는 온도가 상승함에 따라 발생확률이 증가하는 것으로 나타났다(Aukema *et al.*, 2008), 평균온도가 2°C 이상 상승하면 그레이프베리나방(Grape berry moth)의 화성(곤충이 자연 상태에서 1년 동안에 세대를 반복하는 성질)이 크게 영향을 받는 것으로 나타났다(Tobin *et al.*, 2008).

한편, 작물에 발생하는 병충해에 대해 많은 연구와 기술개발이 이루어져 발생면적이 감소하고 있는 것으로 보인다. 하지만 기후변화에 따라 빈발하게 될 병해충이 농작물에 피해를 줄 수 있고 해외로부터 들어오는 병해충 때문에 작물 생산은 부정적인 영향을 받을 것이라는 주장이 제기되고 있다.

우리나라의 경우 식량자급률이 낮으므로 안정적인 식량공급을 위해 기후변화에 의해 어떠한 병해충이 어느 정도 영향을 줄 것인지를 사전적으로 분석하고 그에 따른 대응방안을 도출하는 것은 매우 중요한 과제이다. 이 연구는 기후변화와 병해충 피해면적 간의 상관관계를 밝히는 연구가 국내에는 거의 이루어지지 않는 상황에서 기후변화가 병해충 피해면적 발생에 미치는 영향을 처음으로 분석하는데 의의가 있다. 분석결과는 향후 기후변화에 따른 병해충 피해의 경제적 분석을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 우리나라의 주곡인 쌀 재배를 대상으로 기후변화가 병해충 피해면적 발생에 미치는 영향을 패널모형을 이용하여 분석하고, 정책적 시사점을 도출하는데 목적이 있다.

재료 및 방법

분석모형과 자료

패널분석모형을 이용하여 벼 주요 병해충 관찰포 피해면적 요인을 분석하였다. 패널분석모형은 시계열 과정에서 발생하는 추정오차와 지역별 단위의 자료에서 발생하는 추정오차를 통제할 수 있어 현실을 잘 반영하여 분석할 수 있는 장점이 있다. 분석모형을 일반적인 선형으로 표현하면 다음과 같다.

$$Y_{it} = X_{it}'\beta + u_{it} \quad (1)$$

$$u_{it} = a_i + \epsilon_{it}$$

$$\text{단, } i(\text{지역}) = 1, 2, \dots, N, t(\text{연도}) = 1, 2, \dots, T$$

여기서 i 는 횡단면 관측치를 나타내며, t 는 시간변수를

나타낸다. Y_{it} 는 종속변수를 의미하고 X_{it} 는 설명변수를 의미한다. u_{it} 는 교란항으로 관측 불가능한 횡단효과(a_i)와 나머지 교란항(ϵ_{it})으로 구분된다.

교란항의 형태에 따라 고정효과모형과 확률효과모형으로 나뉘게 된다. 고정효과 모형은 교란항과 독립변수간의 상관관계가 없고, 누락된 변수가 고정된 값을 가지고 있다고 가정하고 있기 때문에 가변수 최소자승법을 모수추정방법으로 활용한다. 확률효과모형은 a_i 를 고정된 상수가 아닌 확률변수로써 고려한다. a_i 는 상호 독립적이며 교란항(ϵ_{it})과도 독립적인 것으로 가정한다.

추정식은 (식2)에서 (식6)과 같이 설정하였다. 쌀 병충해 피해면적(Acreage, ACR)을 설명하는 변수로 먼저 전년도 쌀 병충해 피해면적(ACR(-1)과 기술(시간)변수(Technology, TEC)를 설정하였다. 여기에서 기술변수는 1991년을 1로, 1992년을 2 등으로 설정하였다. 전년도 면적은 전년의 병충해 피해가 당해년도의 병충해 피해에 미치는 영향을 설명한다. 전년도에 병충해 피해를 입은 논인 경우 병균이나 알이 남아 있어 그렇지 않은 논 보다 재발할 가능성이 높기 때문에 양의 상관관계가 있을 것으로 기대된다. 기술변수는 벼 재배에 있어 방제와 시비에 관한 기술들을 나타내는데, 병충해 피해면적과 음의 상관관계를 가질 것으로 기대된다.

다음으로 병충해 종류별로 관계된 기상변수를 추가하여 설정하였다. 먼저 일도열병은 7월 일평균 30mm 이상 비가 내린 일수(Days of Torrential rain of July, RI30JUL)를 설정하였다(식2). 본답초기 일도열병이 저온 다습한 조건에서 발병하므로 이 변수의 계수값은 양의 부호를 나타낼 것으로 예상된다. 다음으로 잎집무늬마름병(Sheath blight, SB)은 7월 일조시간(Sunshine of July, SJUL)을 설명변수로 추가하였다(식3). 잎집무늬마름병은 7~8월 고온다습한 조건에서 잘 발병하므로 이 변수의 계수값은 음의 부호를 나타낼 것으로 예상된다. 줄무늬잎마름병(Stripe, STR)은 6월 강수량(Precipitation of June, RJUN)을 설명변수로 추가하였다(식4). 줄무늬잎마름병은 6월에 중국에서 날아오는 애멸구에 의해 발생하며, 다습한 조건에서 더 잘 발병하므로 이 변수의 계수값은 양의 부호를 나타낼 것으로 기대된다. 흑명나방(Rice leaf roller, RLR)은 6월 최저기온(Lowest temp of June, LTJUN)을 설명변수로 추가하였으며(식5), 흑명나방은 6월에 중국으로부터 날아오는데 상층부 기온이 높을수록 생존률이 높아지므로 이 변수의 계수값은 양의 부호를 나타낼 것으로 예상된다. 벼물바구미(Rice water weevil, RWW)는 2월 평균기온(Highest temp of Feb, HTFEB)을 설명변수로 추가하였다(식6). 벼물바구미는 월동기 생존율이 벼물바구미 밀도에 영향을 미치게 되는데 월동기 생존율은 기온과 반비례 관계에 있으므로 이 변수의 계수값은 양의 부호를 나타낼 것으로 기대된다.

이 논문에서 교란항과 독립변수간의 상관관계가 없고, 누락된 변수가 고정된 값을 가지고 있다고 가정하는 고정효과

모형을 이용하여 분석하였다.

$$ACR = \alpha_0 + \alpha_1 ACR(-1) + \alpha_2 TEC + \alpha_3 RB0JUL \quad (2)$$

$$ACR = \alpha_0 + \alpha_1 ACR(-1) + \alpha_2 TEC + \alpha_3 SJUL \quad (3)$$

$$ACR = \alpha_0 + \alpha_1 ACR(-1) + \alpha_2 TEC + \alpha_3 RJUN \quad (4)$$

$$ACR = \alpha_0 + \alpha_1 ACR(-1) + \alpha_2 TEC + \alpha_3 LTJUN \quad (5)$$

$$ACR = \alpha_0 + \alpha_1 ACR(-1) + \alpha_2 TEC + \alpha_3 HTFEB \quad (6)$$

여기에서 ACR: 쌀 병충해 피해면적; ACR(-1): 전년도 쌀 병충해 피해면적; TEC: 기술(시간)변수, 단, TEC = 1991, 1981, ..., 2011 ; RI30JUL: 7월 일평균 30mm 이상 비가 내린 일수; SJUL: 7월 일조시간; RJUN: 6월 강수량; LTJUN: 6월 최저기온; HTFEB: 2월 평균기온패널모형분석을 위해 쌀 병충해 피해면적 자료는 농촌진흥청 재해대응과 내부 자료를 이용하였으며, 도별 자료가 잘 갖추어진 잎도열병(Leaf Blast, LB), 잎집무늬마름병(SB), 줄무늬잎마름병(STR), 흑명나방(RLR), 벼물바구미(RWW)의 피해면적 자료를 이용하였

다. 자료기간은 각 도별로 1991~2011년까지 21개이다. 줄무늬잎마름병은 자료 이용이 가능한 전북, 전남, 경북, 경남 지역의 2004~2011년까지 8개년도 자료를 이용하였다. 기술 변수는 병해충 피해를 줄이기 위한 기술연구를 나타내며, 해당 연도를 변수로 이용하였다(1991=1, 1992=2, ..., 2011=21). 기상자료는 각 도별 대표지역(수원, 춘천, 청주, 대전, 전주, 광주, 대구, 부산) 자료를 이용하였다. 7월 호우일수는 기상청의 1일 30mm 이상 비가 내린 날 수를 이용하였다. 월 강수량 및 일조량은 기상청의 강수량 및 일조시간 자료를, 월별 기온은 기상청의 월별 기온 자료를 이용하였다. <Table 1>은 분석 자료의 기초통계량을 나타내고 있다. 전체적으로 잎집무늬마름병 피해면적이 23,180ha로 가장 많고, 흑명나방 11,504ha, 벼물바구미 10,158ha, 잎도열병 5,778ha, 줄무늬잎마름병 3,980ha로 각각 나타났다. 지역별로 살펴보면 대체로 쌀 재배면적이 많은 전남 지역의 피해면적 규모가 다른 지역에 비해 크게 나타나고 있다. 2월 최고기온은 7.5°C, 6월 최저기온은 17.9°C, 6월 강수량은 151.9mm, 7월 일조시간은 142시간, 7월 30mm 이상 강수일수 3.5일로 각각 나타났다.

Table 1. Damaged area of rice paddy fields by leaf blast, sheath blight, stripe virus, rice leaf roller, and rice water weevil in Korea during 1991-2011

		LB (ha)	SB (ha)	STR	RLR (ha)	RWW (ha)	TEC	HTFEB (°C)	LTJUN (°C)	RJUN (mm)	SJUL (h/m)	RI30JUL (a day)
GG	M	4,817	37,521	-	10,377	14,534	11.0	5.5	17.7	169.0	132.8	4.4
	SD	5,041	23,061	-	10,277	13,146	6.2	1.7	0.9	97.1	34.4	2.1
GW	M	3,556	12,815	-	3,623	4,337	11.0	5.6	16.6	165.6	138.8	4.0
	SD	2,517	5,053	-	3,796	2,591	6.2	1.7	0.9	128.1	37.1	2.0
CB	M	2,788	17,799	-	5,568	6,282	11.0	6.6	18.0	172.6	143.5	3.4
	SD	2,385	12,031	-	5,050	3,845	6.2	1.8	0.9	140.7	47.6	2.1
CN	M	6,333	49,398	-	15,553	12,493	11.0	7.0	17.7	193.7	145.9	3.4
	SD	4,996	24,406	-	14,335	9,750	6.2	1.8	0.8	127.0	49.4	2.0
JB	M	5,458	31,268	5,498	6,178	5,966	11.0	7.4	18.0	148.7	131.5	3.6
	SD	5,470	14,956	3,127	4,145	3,907	6.2	1.7	0.8	88.1	43.0	2.1
JN	M	9,029	54,354	6,869	20,893	10,822	11.0	8.3	18.5	157.8	137.2	3.4
	SD	7,891	28,911	4,810	16,743	6,433	6.2	1.9	0.7	75.2	47.8	1.6
KB	M	11,491	47,241	1,079	14,764	20,806	11.0	8.9	18.6	136.6	146.1	2.4
	SD	5,680	17,535	755	11,421	12,077	6.2	1.7	1.0	82.9	49.6	2.2
KN	M	7,132	35,818	2,260	15,233	15,052	11.0	10.3	18.1	164.5	160.6	3.7
	SD	5,585	14,460	1,397	7,560	11,689	6.2	1.5	0.7	50.9	52.7	2.4
T	M	6,326	35,777	3,980	11,524	11,282	22	7.5	17.9	151.9	142	3.5
	SD	5,778	23,180	3,739	11,504	10,158	6.1	2.3	1	72.7	45.5	2.1

The period of STR and RJUN: 2004-2011.

LB, Leaf Blast; SB, Sheath blight; STR, Stripe; RLR, Rice leaf roller; RWW, Rice water weevil;

HTFEB, Highest temp of Feb; LTJUN, Lowest temp of June; RJUN, Precipitation of June; SJUL, Sunshine of July; RI30JUL, Days of Torrential rain of July.

M, average; SD, The standard deviation.

Source: Rural development administration, Meteorological Agency

분석결과

<Table 2>는 벼 주요 병해충 관찰포 피해면적 요인을 분석한 결과를 나타내고 있다. 전년 동기면적에 대한 계수값은 모두 양의 부호를 나타냈고, 1% 수준에서 유의하게 추정되었다. 기술변화에 대한 계수값은 모두 음의 부호를 나타냈고, 1% 수준에서 유의하게 추정되었다. 잎도열병, 잎집무늬마름병, 줄무늬잎마름병 등의 병해는 강수량의 증가(혹은 일조량의 감소)와 유의한 양의 상관관계를 나타냈고, 흑명나방, 벼물바구미 등의 병해는 기온의 상승과 유의한 양의 상관관계를 나타냈다. <Table 2>의 분석 결과를 바탕으로 계수값에 대한

탄성치를 계산하면 <Table 3>과 같이 나타난다. 잎도열병 피해면적에 대한 7월의 호우일수 탄성치는 0.267로 나타났으며, 이는 호우일수가 10% 증가하면 잎도열병 피해면적이 2.7% 증가함을 의미한다. 본답초기 잎도열병이 저온다습한 조건에서 발병하는데 이러한 추정결과는 현실을 잘 반영하고 있는 것으로 보인다. 잎집무늬마름병 피해면적에 대한 7월 일조시간 탄성치는 -0.331로 나타났으며, 이는 7월 일조시간이 10% 감소하면 잎집무늬마름병 피해면적은 3.3% 증가함을 의미한다. 잎집무늬마름병은 7~8월 고온다습한 조건에서 잘 발병하는데 추정결과를 이를 잘 말해준다고 할 수 있다.

줄무늬잎마름병 피해면적에 대한 6월 강수량 탄성치는

Table 2. The result of factor analysis of rice damage occurrence by pest insect and disease

	Leaf Blast	Sheath blight	Stripe	Rice leaf roller	Rice water weevil
Constant	11,024.700*** (6.153)	70,657.700*** (8.851)	41.154 (0.045)	-20,822.900 (-1.376)	3,473.820 (1.448)
Area(-1)	0.244*** (3.228)	0.527*** (9.984)	0.544*** (5.122)	0.238*** (3.299)	0.709*** (14.132)
Tec	-359.408*** (-5.173)	-1889.400*** (-8.551)	-15.934** (-2.394)	-438.672*** (-3.023)	-256.995*** (-2.982)
Highest temp of Feb.	-	-	-	-	750.167*** (3.249)
Lowest temp of June	-	-	-	2195.690** (2.498)	-
Precipitation of June	-	-	16.429** (2.810)	-	-
Sunshine of July	-	-83.327*** (-2.787)	-	-	-
Days of Torrential rain of July	475.469** (2.188)	-	-	0.11	0.57
Adj-R2	0.19	0.62	0.60	0.11	0.57
Chi_sq	37.42	164.32	52.64	168(1991-'11)	168(1991-'11)
Samples	168(1991-'11)	168(1991-'11)	30(1998-'11)	168(1991-'11)	30(1998-'11)

***Significant at 1%; **significant at 5%; *significant at 10%.
() denotes t-value.

Table 3. Variable elasticity of factor analysis of rice damage occurrence by pest insect and disease

	Leaf Blast	Sheath blight	Stripe	Rice leaf roller	Rice water weevil
Area(-1)	0.254	0.544	0.544	0.248	0.732
Tec	-1.250	-1.162	-0.114	-0.837	-0.501
Highest temp of Feb.	-	-	-	-	0.496
Lowest temp of June	-	-	-	3.409	-
Precipitation of June	-	-	0.627	-	-
Sunshine of July	-	-0.331	-	-	-
Days of Torrential rain of July	0.267	-	-	-	-

Elasticity was calculated by dividing average of each variable by area and then multiplying by each coefficient

0.627로 나타났으며, 이는 6월 강수량이 10% 증가하면 줄무늬잎마름병 피해면적은 6.3% 증가함을 의미한다. 줄무늬잎마름병은 6월에 중국에서 날아오는 애멸구에 의해 발생하며, 다습한 조건에서 더 잘 발병하므로 추정결과는 이와 같은 상황을 반영하고 있는 것으로 보인다. 흑명나방 피해면적에 대한 6월 최저기온 탄성치는 3.409로 나타났으며, 이는 6월 최저기온이 10% 증가하면 흑명나방 피해면적은 34.1% 증가함을 의미한다. 흑명나방은 6월에 중국으로부터 날아오는데 상층부 기온이 높을수록 생존율이 높아질 것으로 예상되는데 이러한 상황은 추정결과와 일치하는 것으로 보인다. 벼물바구미 피해면적에 대한 2월 최고기온 탄성치는 0.496으로 나타났으며, 이는 2월 최고기온이 10% 상승하면 벼물바구미 피해면적은 5.0% 증가함을 의미한다. 벼물바구미는 월동기 생존율이 벼물바구미 밀도에 영향을 미치게 되는데 월동기 생존율은 기온과 반비례 관계에 있으므로 추정결과가 현실을 나타내고 있는 것으로 보인다.

벼 병해충 방제에 대한 기술진보 효과를 살펴보면, 기술변화에 대한 탄성치는 잎도열병 -1.250, 잎집무늬마름병 -1.162, 줄무늬잎마름병 -0.114, 흑명나방 -0.837, 벼물바구미 -0.501로 각각 유의하게 추정되었다. 벼 재배에 있어 방제와 시비에 관한 기술들이 지속적으로 발전되어 왔고, 그 결과 병충해 피해면적이 감소한 것으로 해석할 수 있다. 이와 같이 병충해 피해면적 원인분석 결과, 기술진보의 긍정적인 효과가 나타났으므로 추후 작물보호 기술을 더욱 개선할 필요가 있다. 또 약제를 살포하지 않고 예찰을 통해 피해를 방지할 수 있는 기술을 개발할 필요가 있다. 이를 위해 대응 기술 연구개발 투자가 보다 확대될 필요가 있다.

피해면적에 대한 전년 피해면적 탄성치는 잎도열병 0.254, 잎집무늬마름병 0.544, 줄무늬잎마름병 0.544, 흑명나방 0.248, 벼물바구미 0.732로 각각 유의하게 추정되었다. 전년 피해면적이 유의하게 추정된 것은 전년에 병충해 피해를 입은 논외의 경우 병균이나 알이 남아 있어 재발할 가능성이 높기 때문인 것으로 보인다.

이상의 분석결과를 살펴본 바와 같이 기온상승 및 강수량 증가가 병해충의 피해면적 발생과 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 나타났으므로 기후변화에 따른 기상변동을 모니터링하고, 지역별 기상을 정밀하게 예측하여 농가단위에 정보를 전달할 수 있는 시스템을 마련할 필요가 있다. 또, 기후변화에 따라 향후 빈발할 것으로 예상되는 병충해의 피해를 최소화하기 위해 체계적인 피해 방지 대책을 수립해야 할 것이다. 집중호우에 따른 병의 피해를 줄이기 위해 방제를 적기에 하는 것 등을 그 일례로 들 수 있다.

결 과

기후변화가 벼 병해충 피해면적 발생에 미치는 영향을 패널모형을 이용하여 분석한 결과, 기온상승 및 강수량 증가가 병해충의 피해면적 발생과 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로 나타났다.

분석결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 기온상승은 흑명나방과 벼물바구미 등 해충의 피해와 관계되는 것으로 나타났다. 2월 최고기온 상승은 벼물바구미 피해를, 6월 최저기온 상승은 흑명나방 피해를 확대시키는 것으로 나타났다. 둘째, 강수량의 증가(혹은 일조량의 감소)는 병의 피해와 관계되는 것으로 나타났다. 6월 강수량 증가는 줄무늬잎마름병 피해를, 7월 일조시간 감소는 잎집무늬마름병 피해를, 7월 호우 일수 증가는 잎도열병 피해를 확대시키는 것으로 나타났다. 셋째, 전년도에 병해충 피해가 발생한 논에서 동일한 병해충 피해가 발생할 가능성이 높은 것으로 나타났다. 이는 전년도에 병해충 피해를 입은 논외의 경우 병균이나 알이 남아 있어 재발할 가능성이 있기 때문이다. 넷째, 벼 병해충 방제에 대한 기술진보의 효과를 살펴본 결과 벼 재배에 있어 방제와 시비에 관한 기술들이 지속적으로 발전되어 왔고 그 결과 병해충 피해면적이 감소한 것으로 나타났다.

기후변화에 따른 병해충 피해면적을 최소화하기 위해 기술 연구개발, 기후변화에 따른 기상변동 모니터링, 체계적인 피해방지 대책 수립 등의 전략이 요구된다.

References

- Aukema, B.H., Carroll, A.L., Zheng, Y., Zhu, J., Raffa, K.F., Moore, R.D., Stahl K and Taylor, S.W. 2008. Movement of outbreak populations of mountain pine beetle: influences of spatiotemporal patterns and climate, *Ecography* 31, 348-358.
- Karuppaiah, V., Sujayanad, G. K., 2012. Impact of Climate Change on Population Dynamics of Insect Pests, *World J. Agric. Sci.* 8, 240-246.
- Kim, C.G., Jeong, H.K., 2010. Weather Impacts on Rice Production in Korea, *Korean Journal of Agricultural Management and Policy* 37, 621-642.
- Kiritani, K., 2006. Predicting impacts of global warming on population dynamics and distribution of arthropods in Japan, *Popul. Ecol.* 48, 5-12.
- Porter, J.H., Parry, M.L., Carter, T.R., 1991. The potential effects of climatic change on agricultural insect pests, *Agric. Forest Meteorol.* 57, 221-240.
- Tobin, P.C., Nagarkatti, S., Loeab G and Saunders, M.C. 2008. Historical and projected interactions between climate change and insect voltinism in a multivoltine species. *Global Change Biol.* 14, 951-957.